ChinaXiv合作期刊



·数智医疗与信息化研究·

# 基于真实世界数据的修正 SEIR 模型应用于疫情防控研究

杨利超[1]，曾华堂[2]，胡梦之[1]，伍丽群[2]，田倩男[2]，韦亮州[2]，朱纪明[1, 3*]，梁万年[1, 3*]

1．100084 北京市，清华大学万科公共卫生与健康学院
2．518028 深圳市，深圳市卫生健康发展研究和数据管理中心
3．100084 北京市，清华大学健康中国研究院
*通信作者：朱纪明，副教授/博士生导师；E-mail：jimingzhu@tsinghua.edu.cn
梁万年，教授/博士生导师；E-mail：liangwn@tsinghua.edu.cn

ChinaXiv:202309.00011v1

【摘要】 背景 奥密克戎在世界各地广泛传播，深圳作为连接国内外交通的重要枢纽，自 2022 年 2 月以来持续受其影响，感染者数量迅速增加。目的 构建修正的易感－暴露－感染－康复（SEIR）模型，为深圳市疫情防控工作提供具有应用价值的政策参考和建议，以缓解防控压力。方法 在传统 SEIR 传染病动力学模型基础上，针对奥密克戎传播速度快、隐匿性高、人群普遍易感等流行病学特征，引入具有政策性特征的组别，即密接者、次密接者、入深隔离者和携带者组别，构建修正 SEIR 模型，拟合 2022-02-18—28 的深圳疫情数据确定修正模型的相关参数。结果 该模型的预测数据与 2022-03-01—04 日的实际数据基本一致，为预测疫情后续发展提供了可靠依据；进一步预测了 2022-03-05—19 的疫情发展趋势，从疫情防控的人工干预程度、介入时间以及床位数、隔离房间数等医疗卫生资源需求等方面为深圳后续的疫情防控措施提供了指导。结论 修正 SEIR 模型在疫情发展预测、防控措施制定和调整以及医疗资源配置等方面具有重要实用价值。

【关键词】 新型冠状病毒感染；奥密克戎；修正 SEIR 模型；预测；政策建议；医疗资源配置
【中图分类号】 R 563.12 【文献标识码】 A DOI：10.12114/j.issn.1007-9572.2023.0292

## Application of Modified SEIR Model in Epidemic Prevention and Control：a Real World Study

*YANG Lichao*[1]，*ZENG Huatang*[2]，*HU Mengzhi*[1]，*WU Liqun*[2]，*TIAN Qiannan*[2]，*WEI Liangzhou*[2]，*ZHU Jiming*[1, 3*]，*LIANG Wannian*[1, 3*]

*1. Vanke School of Public Health，Tsinghua University，Beijing 100084，China*
*2. Shenzhen Health Development Research and Data Management Center，Shenzhen 518028，China*
*3. Institute for Healthy China，Tsinghua University，Beijing 100084，China*
**Corresponding authors：ZHU Jiming，Associate professor/Doctoral supervisor；E-mail：jimingzhu@tsinghua.edu.cn*
*LIANG Wannian，Professor/Doctoral supervisor；E-mail：liangwn@tsinghua.edu.cn*

【Abstract】 **Background** The Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2 Omicron variant （SARS-CoV-2，Omicron） has been widely spread around the world. Since February 2022，Shenzhen was continuously affected by it as a major hub connecting domestic and international transportation，resulting in rapidly increasing number of infected cases. **Objective** To construct a modified susceptible-exposed-infected-recovered （SEIR） model for providing policy references and suggestions with applied value for epidemic prevention and control in Shenzhen，China，so as to alleviate the pressure of prevention and control. **Methods** This study developed a modified SEIR model targeting the epidemiological characteristics of the Omicron variant such as rapid transmission，high concealment，and general susceptibility of the population，introducing groups with policy characteristics as close contacts，secondary contacts，quarantined individuals and carriers，based on traditional SEIR

基金项目：国家自然科学基金资助项目（72091514）；深圳市'医疗卫生三名工程'项目资助（20212001132）；清华大学卫健学院博士后科研专项（2022BH013）；比尔及梅琳达·盖茨基金会项目资助（INV-018302）

引用本文：杨利超，曾华堂，胡梦之，等．基于真实世界数据的修正 SEIR 模型应用于疫情防控研究［J］．中国全科医学，2023. DOI：10.12114/j.issn.1007-9572.2023.0292.［www.chinagp.net］

YANG L C，ZENG H T，HU M Z，et al. Application of modified SEIR model in epidemic prevention and control：a real world study［J］. Chinese General Practice，2023.

本文数字出版日期：

ChinaXiv合作期刊




model of infectious disease dynamics. The relevant parameters of the modified model were determined by fitting the Shenzhen epidemic data of February 18 to 28，2022. **Results** The predicted data of the model were basically consistent with the actual data from March 01 to 04，2022，providing a reliable basis for predicting the subsequent development of the epidemic. Subsequently，the Omicron variant outbreak in Shenzhen between 5 to 19 March 2022 was forecasted through this modified model to provide guidance for epidemic prevention and control measures in terms of the degree and time of manual intervention in epidemic prevention and control，and healthcare resource requirements such as patient beds and isolation rooms. **Conclusion** The modified SEIR model developed in this study has proved its practical value in forecasting epidemic development，formulating and adjusting epidemic control measures，and allocating health resources.

**【Key words】** COVID-19；Omicron；Modified SEIR model；Forecasting；Policies；Health resources allocation

ChinaXiv:202309.00011v1

2021 年 11 月全球受到奥密克戎变异株的影响，COVID-19 疫情进入第四波流行高峰。奥密克戎变异株具有传染性强、传播速度快、隐匿性高、人群普遍易感等特点，给我国疫情防控带来了更多的压力和挑战[1]。2022 年 2 月我国多地发生本土疫情。其中，深圳市作为我国重要口岸和国际国内交通枢纽，人口结构复杂，人员跨区域流动性大、口岸数量多，面临的疫情形势更为严峻。因此，如何为深圳市疫情防控工作提供具有应用价值的政策参考和建议，是缓解防控压力的重要途径。

近年来，易感－暴露－感染－康复（Susceptible-Exposed-Infected-Removed，SEIR）等经典传染病研究模型在 COVID-19 的预测和评估中得到了广泛应用。陈佳丽等[2]在 SEIR 基础上，增加症状前感染者、隔离措施及疫苗接种等要素，建立 SVEPIUHDR 模型，预测英、美两国在疫苗不同接种率下每日新增病例数的变化。于振华等[3]提出 SLEIR 模型，将疫情中采取保护措施的人群加入模型，并对印度 3—5 月的 COVID-19 疫情进行预测。周潜等[4]基于 SIR-MCMC 方法，通过观测湖北省的 COVID-19 疫情数据，从基础再生数、疫苗介入等方面对疫情发展和防控措施进行评估。然而，奥密克戎与前期流行的新型冠状病毒变异株在流行病学特征方面存在较大差异——例如，其传播能力是德尔塔变异株的 2 倍，奥密克戎 BA.2 比奥密克戎 BA.1 的传染性又增加了 30%[5]。同时，早期研究建立的疫情传播动力学模型对潜伏期组别的定义范围较广，导致无法及时判断疫情隐匿性传播的时间和范围。因此，需要构建更有针对性的传播模型才能对深圳市 COVID-19 疫情的发展趋势做出更为精准地判断。

此外，在预测和评估疫情发展的基础上，学术界开始逐步借助 SEIR 模型研究人工干预措施对遏制疫情传播的作用。肖燕妮等[6]基于 SEIR 模型，构建了新的演化方程，探究干预措施的实施、民众行为的变化、疫苗接种率和时效性、外界诱因以及病毒传播强度等因素同疫情反复的关系。唐三一等[7]将动力学模型与少量实时数据结合，不仅对疫情风险展开了分析，还对防控策略的有效性和时效性进行了评估。但是，多数侧重于回顾性研究，忽略了 SEIR 模型在早期预警、政策支持以及在真实世界中引导防控措施调整及医疗资源分配等方面的重要作用。

综上所述，有鉴于先前研究，本文构建了修正的 SEIR 模型：（1）通过对奥密克戎流行病学特征的深入分析，引入了携带者组别；（2）根据深圳市干预措施、干预程度和时间变化，将被隔离者精细划分为三类组别：密接者（$Q_1$）、次密接者（$Q_3$）以及入深隔离者（$Q_2$）；（3）基于真实世界数据，运用 Python 进行仿真模拟。本研究得到的部分预测数据不仅实现了早期预警，还能为深圳市后续的防控政策调整和医疗资源配置提供决策支持。

## 1 资料与方法

### 1.1 数据来源与假设

本文所采用的真实疫情数据部分来源于深圳市卫生健康委员会官方网站（http：//wjw.sz.gov.cn/）和国家卫生健康委员会（http：//www.nhc.gov.cn/）疫情通报数据，还有部分来自产业报告[8]、新闻[9-11]、百度实时数据[12]等公开数据。数据得到了相关专家和一线工作人员的认可。

本研究中修正 SEIR 模型的基本假设是：

（1）不考虑人群的变化，包括出生、死亡、流动，即此地区是一个封闭的环境，总人群是一个常数，不发生变化；任何时刻的人类人群总数不变：$S(t)+A(t)+R(t)+D(t)+Q_1(t)+Q_2(t)+Q_3(t)=17\,560\,100$。

（2）考虑到在疫情期间进入深圳的流动人口，需要根据深圳的疫情防控政策要求进行一定时间的集中隔离，于是，本文称之为入深隔离人员。入深隔离人员基本由国内中高风险地区入深人员、境外输入人员和香港入深人员组成，根据获得的相关数据可知，入深隔离人员数量每日基本维持在 900 左右，于是设置 $L_1=900$。

（3）假设全民筛查最终可筛选出全部本地阳性患者（不一定即刻筛出，但按照中国的严格措施，阳性患者不会被漏掉）。

（4）假设不存在 COVID-19 治愈特效药。

ChinaXiv合作期刊



ChinaXiv:202309.00011v1

（5）为简化模型，暂且不考虑康复者复阳情况。

## 1.2 修正 SEIR 模型

SEIR 模型是传染病研究中一种经典的动力学模型，最早由 KERMACK 等[13]于 1927 年提出，模型简洁，参数较少，可被广泛地研究和使用。SEIR 模型假设在一个复杂网络群体中所有个体可以大致分为有限的几种状态，研究者可根据流行病发展和研究阶段的需要，组合使用这些状态以表现不同状态之间的转换顺序和流行病所处的阶段。经典的 SEIR 模型将人群分为易感者（Susceptible，*S*）、暴露者（Exposed，*E*）、感染者（Infected，*I*）和康复者（Recovered，*R*）。本文针对深圳市当前的疫情防控政策在传统的 SEIR 模型上引入政策性组别密接者（$Q_1$）、次密接者（$Q_3$）、入深隔离者（$Q_2$）和携带者（*A*）做了如下两点改进：

（1）传统的 SEIR 模型中 *E* 指接触过感染者但不具传染性的人群组别。但是，奥密克戎变异株具有 1~3 d 的潜伏期，且传染性强，因此，传统的 SEIR 模型不再适用于由奥密克戎变异株引起的传播。于是，本研究引入携带者群组 *A* 代替了传统 SEIR 模型中暴露者群组 E 的人群组别状态，并将该组别人群定义为已经携带奥密克戎病毒，但在被确诊为阳性前，一直隐匿在本地疫情传播链条中。

（2）深圳市针对 COVID-19 疫情采取的防控策略主要包括以下几种手段：对中高风险地区、境外以及香港入深人员的闭环管理；全民核酸筛查；集中隔离感染者的密接者和次密接者；定点医院救治感染者。因此，本模型中引入入深隔离者（$Q_2$）和中高风险地区、境外以及香港入深人员的闭环管理策略。携带者群组 A 影响全民核酸筛查的时间长度和频率。人群组别新增密接者（$Q_1$）和次密接者（$Q_3$）影响集中隔离感染者的密接者和次密接者策略的实施。此外，有症状和无症状的感染者均会被立即送往定点医院进行隔离治疗，故本研究中的修正 SEIR 模型将两者均归为感染者组别。具体的人群转化关系如图 1 所示，其中黑色箭头表示各个人群组别间的状态间转化关系。

用于奥密克戎疫情防控的修正 SEIR 动力学方程构建如下：

$$
\begin{aligned}
dS/dt &= -(p_1+p_3+\beta)S(\theta_1 A+\theta_1 * \theta_2 I)+\lambda_1 Q_1+\lambda_3 Q_3+q_s Q2-L_1\\
dA/dt &= \beta S(\theta_1 A+\theta_1 * \theta_2 I)-\varepsilon A\\
dI/dt &= \varepsilon A+\delta_1 Q_1+\delta_3 Q_3+q_i Q_2-(r_i+d_i)I\\
dR/dt &= r_i I\\
dD/dt &= d_i I\\
dQ_1/dt &= p_1 S(\theta_1 A+\theta_1 * \theta_2 I)-[\lambda_1+\delta_1]Q_1\\
dQ_2/dt &= L_1-(q_i+q_s)Q_2\\
dQ_3/dt &= p_3 S(\theta_1 A+\theta_1 * \theta_2 I)-[\lambda_3+\delta_3]Q_3
\end{aligned}
\qquad (1)
$$

## 1.3 模型参数处理、赋值和拟合检验

根据文献［14］，本研究假设病毒携带者和感染者具备相同的传播能力，故引入参数 $\theta_1$（图 1）。采取闭环管理的入深隔离人员对本地疫情暴发的影响很低，故设置 $\theta_2$ 表示诱发本地疫情的感染者与所有筛选出的总感染者的比值（图 1）。奥密克戎的潜伏期一般在 2~3 d[15]，本文设定其被检测出阳性的时间均值为 3 d，根据文献［15］可设定 $\varepsilon$=1/3。

同理，根据文献［16］的相关研究，已知深圳市对于密接人员采取 14 d 集中隔离，故设定 $\lambda_1$=1/14，对于次密接人员采取 7 d 集中隔离，故设定 $\lambda_3$=1/7。文献［17］研究了武汉疫情 2020-01-23—02-12 的情景，由于武汉疫情涉及的新型冠状病毒潜伏期较长，早期的人工干预措施力度较低且疫苗的覆盖范围有限，导致接触感染概率 $\beta$ 被高估，于是本研究以深圳市 2022-02-18—28 的数据作为训练集来训练新模型，将接触感染概率 $\beta$ 从 $2.05\times10^{-9}$ 调整为 $1\times10^{-9}$。并且基于当前更多的原始数据对参数 $q_s$、$\delta_1$ 和 $\delta_3$ 进行拟合优化，从而提高模型预测的准确性。

对于参数 $q_s$、$\delta_1$、$\delta_3$ 的设定，本文采用启发式算法[18]。由于参数 $q_s$ 表示入深隔离者在隔离的单位时间内筛查出感染者的概率，参数 $\delta_1$ 表示密接者群体中单位时间里与感染个体接触并被传染的概率，参数 $\delta_3$ 表示次密接者群体中单位时间里与感染个体接触并被传染的概率。故 $q_s$、$\delta_1$ 和 $\delta_3\in[0,1]$。本文对该范围进行随机采样，其中，设置 $q_s$ 的数量级为 $1\times10^{-3}$，$\delta_1$ 和 $\delta_3$ 的粒度为 $1\times10^{-5}$。把 $q_s$、$\delta_1$ 和 $\delta_3$ 的采样过程进行迭代，设置迭代次数为 10 000，并将其不同的样本带入修正 SEIR 动力学方程中进行求解，以均方根误差（Root Mean Squared Error，*RMSE*）最小为约束原则与真实数据进行比对，优化得到该粒度下的最优解参数。

$$RMSE=w_1\times RMSE_1+w_2\times RMSE_2 \qquad (2)$$

其中，$RMSE_1$ 和 $RMSE_2$ 分别为现存感染者和现存密接者的均方根误差。$w_1$ 和 $w_2$ 分别是现存感染者和现存密接者 *RMSE* 的权重，用于加速搜索最优解，可以在搜索过程中根据拟合的需求进行调整，本文将其均设置

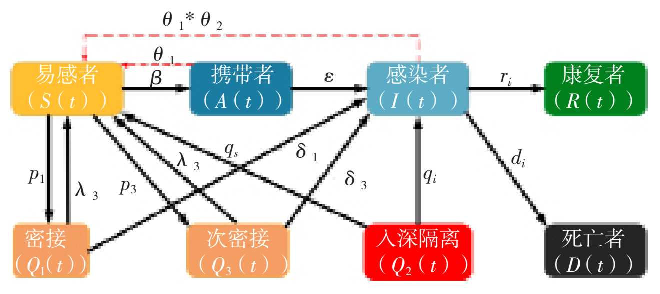



图 1 修正的 SEIR 传染病动力学模型

**Figure 1** Modified SEIR model

ChinaXiv合作期刊





为 1。

涉及的其他相关参数 $p_1$、$p_3$、$q_i$ 均通过真实数据计算可得。为了精简说明，本文以隔离易感者为密接者的转换率 $q_i$ 计算公式为例阐述（见公式（3））：

$p_1$= 平均新增密接者人数 /［第 $t$ 日易感者人数 ×（$\theta_1$× 第 $t$ 日携带者人数 + $\theta_1$× $\theta_2$× 感染者人数）］ （3）

其中，$\theta_1$ 表示每个携带奥密克戎病毒的人在人工干预下，平均可传染 1.5 个人[19]。此外，本文设置的感染者不仅包含社会面新增的感染者，还包含入深隔离人群中新增的感染者。根据数据搜索和统计分析[20]发现，本研究中设置的感染者群组中接近 2/3 的新增感染均来自于入深隔离过程中增加的感染者，且该部分感染者均采取闭环管理措施，外溢概率很小，因此设置引起本地疫情暴发的关联参数 $\theta_2$=0.316。

本文模型中的感染者 $I$ 为截至到 $t$ 日现存感染者人数，则其定义为：

$I$（$t$）= 第 $t$ 日新增感染人数 – 第（$t$–1）日新增康复人数 + 第（$t$–1）日现有感染者人数 （4）

类似的变量还有 $Q_1$、$Q_2$ 和 $Q_3$。

上述修正的 SEIR 模型参数值和含义如表 1 所示，参数值的来源在表中列出。

为了检验此模型与现实数据的拟合程度，本文使用深圳市 2022-02-18—28 现存感染者和现存密接者等相关数据对模型参数进行拟合并且获得了相关参数的初始拟合值和 95%*CI*。将模型预测的 2023-03-01—04 现存感染者和现存密接者数量与后续报告数据做对比，发现均在其置信区间内（图 2 和图 3），研究结果初步证明该修正 SEIR 动力学模型对疫情走势的评估是可靠的。但据表 2 可知，深圳在 3 月 4 日和 3 月 12 日适时修改并提前采取了新的干预措施，使得修正 SEIR 模型和 3 月 4 日之前实际数据比对更具有准确性和时效性。后续收紧的防控政策明显表明 2022-03-05—19 的预测值高于实际数据值，疫情防控效果显著。因此，本文将不再展示 3 月 4 日后的实际数据值。

**表 1** 修正 SEIR 动力学模型参数表

**Table 1** The parameter table of modified SEIR model

| 参数 | 含义 | 取值 | 来源 |
|---|---|---|---|
| $p_1$ | 易感者成为密接者的转化率 | 0.000 000 235 | 计算公式 |
| $p_3$ | 易感者成为次密接者的转化率 | 0.000 000 03 | 计算公式 |
| $\lambda_1$ | 密接者成为易感者的转化率 | 1/14 | 文献[16] |
| $\lambda_3$ | 次密接者释放为易感者的速率 | 1/7 | 文献[16] |
| $\beta$ | 易感者的接触感染概率 | 0.000 000 001 | 文献[17] |
| $\varepsilon$ | 病毒携带者转化为感染者的速率 | 1/3 | 文献[15] |
| $q_s$ | 入深隔离者释放为易感者的速率 | 0.09（95%*CI*：0.089~0.091） | 参数拟合 |
| $\delta_1$ | 密接者中发现感染者的概率 | 0.001 77（95%*CI*：0.001 70~0.001 84） | 参数拟合 |
| $\delta_3$ | 次密接者中发现染者的概率 | 0.001 00（95%*CI*：0.000 91~0.001 09） | 参数拟合 |
| $q_i$ | 入深隔离者变成感染者的速率 | 0.002 87 | 计算公式 |
| $r_i$ | 康复者的增加速率 | 0.007 | 国家卫健委 |
| $d_i$ | 死亡者的增加速率 | 0 | 百度实时数据 |
| $\theta_1$ | 感染者的平均传播速率 | 1.5 | 文献[19] |
| $\theta_2$ | 感染者诱发本地感染的概率 | 0.316 | 文献[20] |
| $S$ | 常住人口 | 17 537 158 | 第七次人口普查 |
| $A$ | 2 月 17 日新增本土感染者数量 | 3 | 国家卫健委 |
| $I$ | 截至 2 月 18 日现存感染者数量（有症状和无症状） | 123 | 国家卫健委 |
| $R$ | 截至 2 月 18 日累计康复者数量 | 649 | 百度实时数据 |
| $D$ | 截至 2 月 18 日累计死亡者数量 | 3 | 百度实时数据 |
| $Q_1$ | 截至 2 月 18 日现存密接者数量 | 约 7 200 | 公开数据[9-11] |
| $Q_2$ | 截至 2 月 18 日现存入境隔离人员数量 | 约 14 000 | 公开数据[8-12] |
| $Q_3$ | 截至 2 月 18 日现存次密接者数量 | 约 1 000 | 公开数据[9-11] |

## 2 结果与讨论

本文以深圳市真实疫情数据为基础构建修正的 SEIR 模型，使用 Python 软件模拟深圳市 COVID-19 疫情发展趋势，深圳市分析结果为当地疫情防控政策调整和医疗资源配置提供了决策支持。本文的分析方法同样适用于其他国家和地区，可以为 COVID-19 或类似传染病防控提供启发借鉴。

本研究中的结论主要从以下三个方面进行展示：对疫情发展趋势的早期预警、为相关防控措施调整和医疗资源优化配置提供决策支持。

### 2.1 深圳市 COVID-19 疫情的早期预警

随着奥密克戎变异株在全球的广泛传播，深圳市作为国内外交通的重要枢纽，面临了较大的疫情防控压力。本文根据 2022-02-18—28 的深圳市卫生健康委员会公布的实时数据开展基于奥密克戎修正 SEIR 动力学模型的仿真校正，预测至 3 月 19 日的感染者、密接者、本土新增感染者、次密接者、入深隔离者的变化情况，助力疫情的早期预警。

按照模型预测，如果继续执行 3 月 3 日前的疫情防控措施，深圳感染者人数在 3 月 19 日之前将呈线性增长，并在 3 月 19 日增长至约 1 800 人（图 4），密接者增长至 30 000 人（图 5）。模型预测形势严峻，警示作用明显：

ChinaXiv:202309.00011v1

ChinaXiv合作期刊



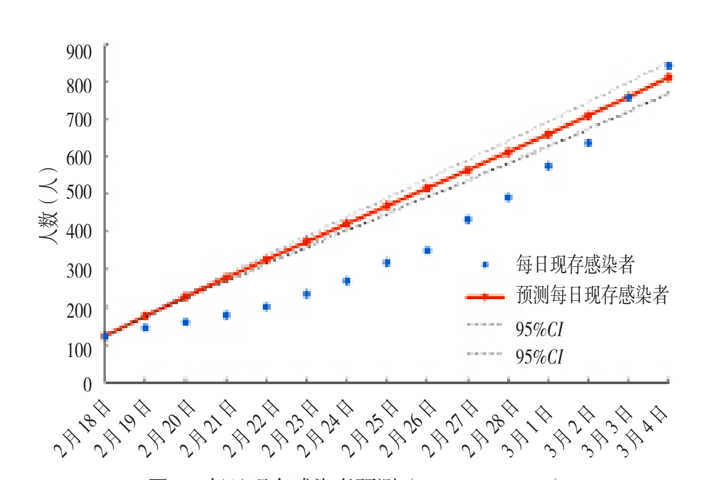



图 2　每日现存感染者预测（$RMSE_1$=106.36）
**Figure 2**　Daily prediction of existing infections

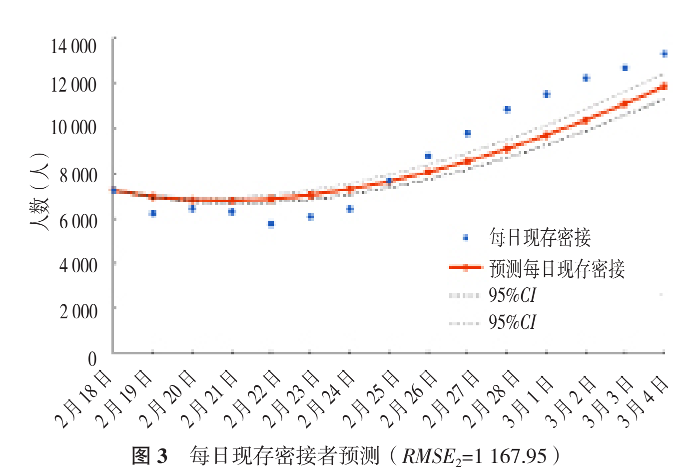



图 3　每日现存密接者预测（$RMSE_2$=1 167.95）
**Figure 3**　Daily prediction of existing close contacts

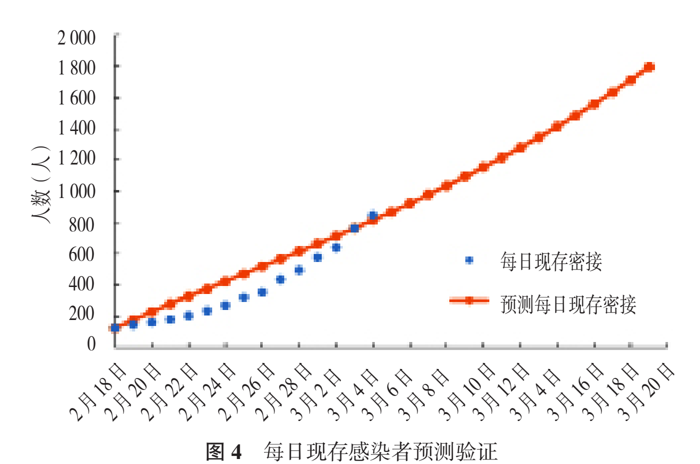



图 4　每日现存感染者预测验证
**Figure 4**　Validation of daily prediction of existing infections

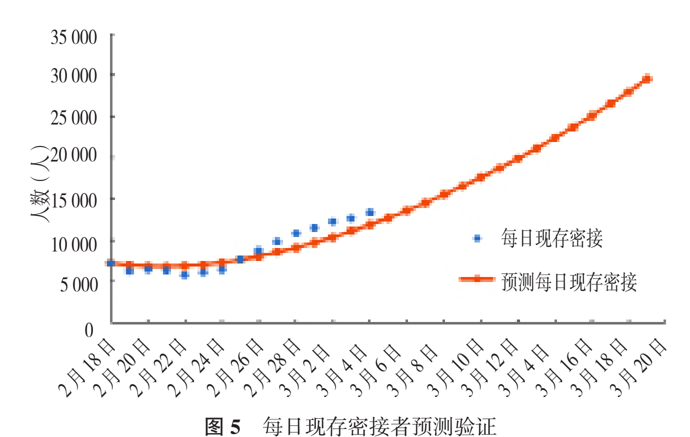



图 5　每日现存密接者预测验证
**Figure 5**　Validation of daily prediction of existing close contacts

表 2　深圳市 2022-02-18—03-20 疫情防控措施演进总结
**Table 2**　The summary of epidemic prevention and control measures in Shenzhen，from February 18 to March 20，2022

| 时间 | 控措施防 |
|---|---|
| 02-18—03-03 | 密接者 14 d 集中隔离 +7 d 居家健康监测 |
| | 次密接者 7 d 集中隔离 +7 d 居家健康监测 |
| | 入深隔离者 14 d 集中隔离 +7 d 居家健康监测 |
| | 感染者 14 d 定点医院集中治疗 +7 d 居家健康监测 |
| | 公共场所需持 48 h 内核酸检测阴性证明 |
| | 重点区域 1 次 /d 全民核酸筛查 |
| 03-04—03-13 | 密接者 10 d 集中隔离 +4 d 居家健康监测 |
| | 次密接者 7 d 居家健康监测 |
| | 入深隔离者 14 d 集中隔离 +7 d 居家健康监测 |
| | 感染者 14 d 定点医院集中治疗 +7 d 居家健康监测 |
| | 公共场所需持 48 h 内核酸检测阴性证明 |
| | 重点区域连续 4 d 核酸筛查 |
| 03-14—03-20 | 按下 1 周暂停键 |
| | 密接者 14 d 集中隔离 +7 d 居家健康监测（10 d 集中隔离 +4 d 居家健康监测） |
| | 次密接者 7 d 居家健康监测 |
| | 入深隔离者 14 d 集中隔离 +7 d 居家健康监测 |
| | 轻型病例 14 d 集中隔离 +7 d 居家健康监测 |
| | 普通型、重型和危重型病例 14 d 定点医院集中治疗 +7 d 居家健康监测 |
| | 公共场所需持 24 h 内核酸检测阴性证明 |
| | 重点区域 3 轮 /d 核酸筛查 |
| | 全市范围开展 3 轮全员核酸筛查 |

（1）感染者对医院床位冲击严重，医疗资源挤兑现象发生的风险上升；（2）隔离房间可能迅速出现短缺。

根据早期预警，深圳可以及时调整 COVID-19 备用床位、隔离房间等资源的配置（详细分析请见 3.3 部分），做好准备，亦可同时有针对性地调整疫情防控措施。本文根据时间线梳理了深圳市疫情防控措施的演进（见表 2），疫情防控措施的调整预防了早期预警中不利情形的发生。

### 2.2　SEIR 动力学模型在深圳市疫情防控措施调整中的决策支持

通过在研究中引入携带者组群，本研究得出了本地新增感染者的预测曲线（图 6）。根据筛查经验可知，携带者大概会在 3 d 内通过核酸检测被排查出阳性，因此本文将预测的第（n-3）日的携带者数据转换为第 n

ChinaXiv:202309.00011v1

ChinaXiv合作期刊



ChinaXiv:202309.00011v1

日的本地新增感染者预测数据，通过与实际公布的本地新增感染者数据对比分析总结出可用于指导全民核酸筛查的力度。

通过图 6 可知，在 2022-02-18—03-03 期间深圳每日本土新增感染者数据明显高于模型预测数据。通过对比分析，本研究得出以下结论：当筛查出的本土新增感染者数据高于模型预测值时，则表明前一阶段的全民筛查工作成效明显，如维持当前筛查力度，将会筛查出更多的感染者，避免疫情的进一步扩散，不久每日本土新增感染者数量将呈缓慢下降趋势。但深圳市在 2022-03-04—11 调整了密接和次密接的人工干预措施和核酸筛查力度。于是卫生健康委员会的官方通报数据显示，2022-03-04—11 期间筛查出的本土新增感染者数量出现明显下降，与模型预测的趋势相悖，表明深圳市本轮疫情拐点未出现，社区内隐匿性传播依然存在并呈扩散趋势，全市面临疫情反弹的概率较高，增加当前的核酸筛查力度迫在眉睫。随着疫情发展，官方通报的数据也验证了本研究得出的结论。本轮疫情在 2022-03-12 出现首次反弹，本土新增感染者高达 66 例——这说明前几日的“乐观”数据（例如，3 月 8 日新增感染者仅 6 例）并非源于疫情得到有效控制，而是因为漏筛。有鉴于此，2022-03-12 凌晨全市“10+1”区全面升级疫情管控的通告发出后，2022-03-13 晚，深圳市新型冠状病毒肺炎疫情防控指挥部再发通告，要求全市在 2022-03-14—20 间按下“暂停键”，同时开展 3 轮全员核酸检测。官方数据显示深圳市在结束为期一周的“慢生活”模式后，疫情传播势头得到了全方位的遏制，向好发展态势清晰。

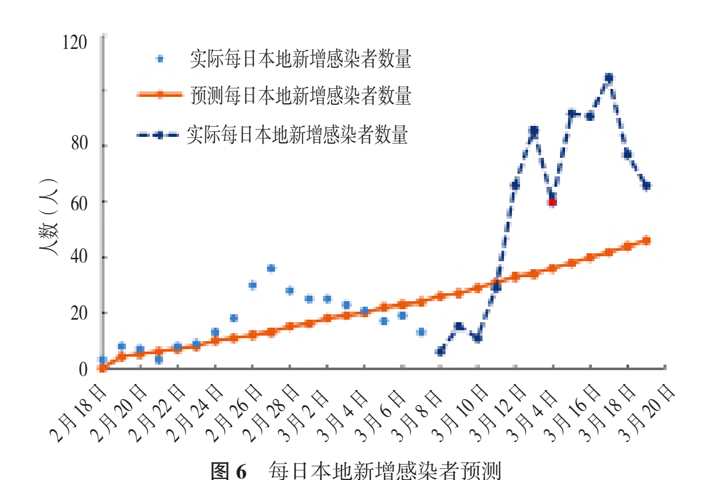



**图 6** 每日本地新增感染者预测
**Figure 6** Daily prediction of new local infections

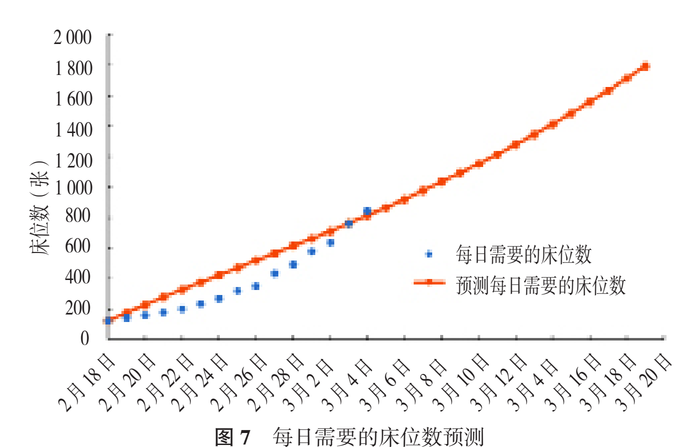



**图 7** 每日需要的床位数预测
**Figure 7** Daily prediction of required hospital beds

### 2.3　医院床位数和隔离房间等医疗资源需求分析

《新型冠状病毒肺炎诊疗方案（试行第八版）》诊疗方案建议对感染者采取住院集中治疗的方式。同时根据 1991 年颁布的《中华人民共和国传染病防治法实施办法》和 2020 年国家卫生健康委员会印发的《重症医学科建设管理指南（试行）》可知，感染者需采用一人一床的管理方案。因此，根据图 7 横向分析可知，预测的床位数略高于实际需求的床位数，在合理范围内保证了感染者一人一床的需求。在 2022-03-03 左右，实际所需床位数开始高于预测所需的床位数，平均每天的增长幅度高达 7.8%。2022-03-19 床位数需求将增长至 125%。建议相关部门应提前采取措施，搭建方舱医院、调配相关医生和护士、按需存储防护服、呼吸机和口罩等医疗资源。

根据深圳市隔离防控策略，本研究预测了 2022-03-01—03-19 隔离房间的使用情况。同床位数相比，隔离房间的短缺更为紧迫。图 8A 预测了每日隔离的次密接者所需隔离房间的情况，图 8B 预测了每日隔离入深人员、密接者和次密接者所需总隔离房间的情况。基于现有隔离措施，隔离房间需求将迅速（3 月 10 日）突破 30 000 间的阈值，在 3 月 19 日更是达到 42 000 间。决策者要主动调整或被迫改变隔离措施，例如适当减少密接者的隔离天数，或者次密接者由集中隔离改为居家隔离，从而释放出更多隔离房间。如果从 3 月 9 日改变次密接者的隔离政策，模型预测最多可释放 5.9% 的隔离房间供密接者和入深隔离者应急使用，但缩短次密接者的隔离时间将为“内防反弹”带来较大的隐患。但如果不调整次密接隔离政策，这将直接影响密接者和入深隔离者的集中隔离，从而为“外防输入”带来更大的困难。依照模型推算，相关部门需要在此时收紧入深策略，降低入深人员数量，同时开始准备备用隔离场地。

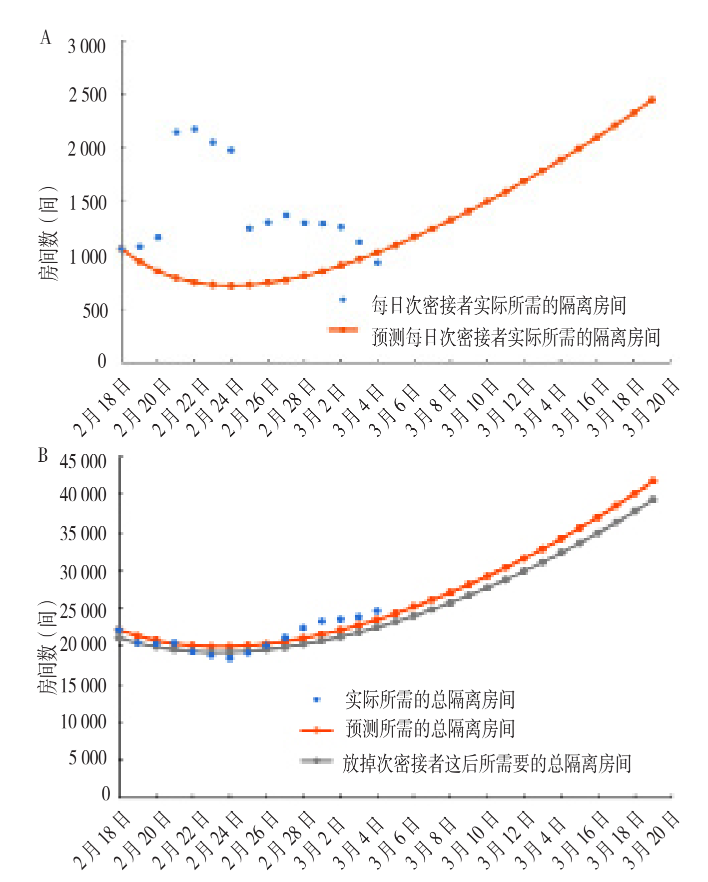
### 2.4　SEIR 动力学模型的局限性

首先，SEIR 模型存在固有缺陷。动力学模型的数学假设非常严格，现实世界比抽象的模型总是更复杂，模型只能考虑重要的传染病流行规律，无法充分考虑各种防控措施、防控措施的动态变化以及执行效果对疫情演进的影响，对现实世界疫情的预测能力有其固有的局限性。据表 2 可知，深圳市在 2022-03-04 和 2022-03-

ChinaXiv合作期刊



ChinaXiv:202309.00011v1




注：A 为每日次密接者所需的隔离房间数预测；B 为每日所需的总隔离房间数预测。

**图 8** 每日所需的隔离房间数预测

**Figure 8** Daily prediction of demand of isolation rooms

12，均适时修改并提前采取了新的干预措施，根据后续的深圳市疫情发展情况观察到新修订的干预措施取得了明显的防疫成果，表明本研究提出的修正 SEIR 模型在预警、政策调整以及医疗资源配置方面具有良好的理论建议指导。但是也暴露出修正 SEIR 模型时效性较短和后续准确性不高等特点，因此，动态实时的修正 SEIR 模型将是未来的重要研究方向。

## 3 结语

本文基于奥密克戎的传播特征、疫情环境特点和干预政策，构建了符合深圳市实际传播规律的修正 SEIR 模型，模拟了 2022-02-18—02-28 的疫情状况，预测了 2022-03-01—19 的疫情发展趋势，通过观察 $S$、$A$、$I$、$R$、$Q_1$、$Q_2$、$Q_3$ 的变化情况，研判是否需要调整防控政策以及帮助合理配置医疗资源。本研究表明，人工干预措施会改变疫情的发展趋势，加入干预措施越多越能降低疫情的影响程度，因此政府应号召社会及群众及时做好各类防范措施，争取以最快速度消灭疫情。本研究通过预测还发现，人工干预介入时间的不同也会影响疫情的走向，因此，在疫情发酵前通过预测数据，可以为人工干预措施的实施争取准备时间，减慢疫情发展速度，降低相关影响。

作者贡献：杨利超负责选题、构建模型、计算机代码实现算法、原稿写作；杨利超、胡梦之负责构建模型、清洗保留研究数据、修改原稿；田倩男、韦亮州负责调查开展、数据搜集；曾华堂、伍丽群负责提供研究数据和负责验证研究结果；朱纪明、梁万年对选题进行指导，对文章涉及观点及立论依据进行审阅和修订；所有作者确认了论文的最终稿。

本文无利益冲突。

## 参考文献

[1] 黄云，李依红，谢仕兰，等. 新型冠状病毒 Omicron 变异株研究进展［J］. 中华流行病学杂志，2022，43（5）：655-662. DOI：10.3760/cma.j.cn112338-20220121-00061.

[2] 陈佳丽，金美玲，王霞，等. 基于 SVEPIUHDR 传染病动力学模型的新型冠状病毒肺炎疫情趋势分析［J］. 中华流行病学杂志，2021，42（8）：1341-1346. DOI：10.3760/cma.j.cn112338-20210225-00147.

[3] 于振华，黄山阁，杨波，等. 新型冠状病毒肺炎传播动力学模型构建与分析［J］. 西安交通大学学报，2022，56（5）：43-53. DOI：10.7652/xjtuxb202205005.

[4] 周潜，欧宜贵，邓新春，等. 基于 SIR-MCMC 方法的新冠肺炎疫情评估与防控［J］. 长沙大学学报，2022，36（2）：14-19. DOI：10.3969/j.issn.1008-4681.2022.02.003.

[5] 王翔. 深圳东莞多起疫情散发，此轮皆为奥密克戎变异株［EB/OL］.［2023-04-23］.https：//finance.sina.com.cn/china/gncj/2022-03-01/doc-imcwiwss3617790.shtml.

[6] 肖燕妮，李倩，周伟柯，等. 新型冠状病毒肺炎疫情多次暴发的动力学机制分析［J］. 中华流行病学杂志，2021，42（6）：966-976. DOI：10.3760/cma.j.cn112338-20210219-00123.

[7] 唐三一，肖燕妮，彭志行，等. 新型冠状病毒肺炎疫情预测建模、数据融合与防控策略分析［J］. 中华流行病学杂志，2020，41（4）：480-484. DOI：10.3760/cma.j.cn112338-20200216-00107.

[8] 产业信息网. 2019 年中国出入境情况分析：出入境人员达 6.7 亿人次［EB/OL］.［2022-04-20］. https：//m.chyxx.com/industry/202006/878155.html.

[9] 网易新闻. 实时更新 | 新冠肺炎疫情动态地图［EB/OL］.［2022-03-04］. https：//wp.m.163.com/163/page/news/virus_report/index.html.

[10] 李响，王涛. 探访深圳湾口岸—深港联动落实口岸疫情防控政策［EB/OL］.［2022-02-30］. https：//m.thepaper.cn/baijiahao_16682282.

[11] 第一财经资讯. 香港返深人员连日大增，深圳接转资源能力严重超限［EB/OL］.［2022-03-12］. https：//baijiahao.baidu.com/s?id=1724376472398732332&wfr=spider&fOR=pc.

[12] 百度疫情实时大数据报告. 实时更新：新型冠状病毒肺炎疫情地图［EB/OL］.［2022-03-04］. https：//voice.baidu.com/act/newpneumonia/newpneumonia.

[13] KERMACK W O，MCKENDRICK A G. A contribution to the mathematical theory of epidemics［J］. Proc R Soc Lond Ser A

ChinaXiv合作期刊






Contain Pap a Math Phys Character，1927，115（772）：700-721. DOI：10.1098/RSPA.1927.0118.

[14] 潘兴强，陈奕，王爱红，等. 宁波市15起新型冠状病毒肺炎聚集性疫情的传播力研究［J］. 中华流行病学杂志，2020，41（12）：2010-2014. DOI：10.3760/cma.j.cn112338-20200330-00466.

[15] 潘静静，王莹莹，王文华，等. 一起由奥密克戎变异株BA.2.2引起的河南省新冠肺炎本土疫情流行病学特征分析［J］. 中国公共卫生，2022，38（8）：975-979. DOI：10.11847/zgggws1138726.

[16] 徐恭贤，冯恩民，王宗涛，等. SARS流行病的SEIR动力学模型及其参数辨识［J］. 黑龙江大学自然科学学报，2005，22（4）：459-462，467. DOI：10.3969/j.issn.1001-7011.2005.04.009.

[17] 曹盛力，冯沛华，时朋朋. 修正SEIR传染病动力学模型应用于湖北省2019冠状病毒病（COVID-19）疫情预测和评估［J］. 浙江大学学报（医学版），2020，49（2）：178-184. DOI：10.3785/j.issn.1008-9292.2020.02.05.

[18] ARMOUR G C，BUFFA E S. A heuristic algorithm and simulation approach to relative location of facilities［J］. Manag Sci，1963，9（2）：294-309. DOI：10.1287/mnsc.9.2.294.

[19] CHEN J H，WEI G W. Omicron BA.2（B.1.1.529.2）：high potential to becoming the next dominating variant［J］. ArXiv，2022：2202.05031v1.

[20] 周燕，马文军. 常态化防控阶段我国新冠肺炎本土疫情的特点和防控经验［EB/OL］.（2021-12-12）［2023-01-12］. http://www.gdspma.org.cn/tre-info/829.html.

（收稿日期：2023-06-19；修回日期：2023-08-16）

（本文编辑：崔莎）

ChinaXiv:202309.00011v1